

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ПИЛИПЕНКО ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.565.2:4

**ДИНАМІКА КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛЬОДУ НА ВЕРТИКАЛЬНИХ
ОХОЛОДЖУВАНИХ ТРУБАХ В ЕЛЕМЕНТАХ АКУМУЛЯТОРІВ
ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА
КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ**

Спеціальність: 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій
МОНМС України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Засядько Ярослав Іванович,
Національний університет харчових технологій, м. Київ,
професор кафедри теплоенергетики та холодильної
техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Потапов Володимир Олексійович,
Харківський державний університет харчування та
торгівлі, м. Харків,
завідувач кафедри холодильної та торговельної техніки

доктор технічних наук, доцент
Туз Валерій Омелянович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
професор кафедри атомних електричних станцій та
інженерної теплофізики

Захист відбудеться « 28 » листопада 2012 року о 14-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-439.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий « 22 » жовтня 2012 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к. т. н., доцент

В. М. Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Актуальність дисертаційної роботи полягає у її спрямованості на зниження та оптимізацію енергоспоживання систем холодопостачання підприємств молокопереробної галузі та кондиціювання повітря, що дозволить суттєво знизити витрати на оплату спожитої електричної енергії. В роботі виокремлено ряд актуальних задач аналітичного та експериментального дослідження, які знаходяться у логічній послідовності. Вирішення цих задач дозволило отримати необхідну інформацію та розробити на її основі науково-обґрунтовані методики розрахунку та проектування оптимальних акумуляторів теплової енергії з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні, а також визначити оптимальні часові проміжки періодів «зарядки» та «розрядки» акумулятору.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконувалась згідно плану держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ “Розроблення наукових основ створення вискоефективного тепломасообмінного обладнання для харчової промисловості” (номер державної реєстрації №0112U002987).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка наукових основ розрахунку та вибору акумуляторів теплової енергії періодичної дії з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні для зниження енерговитрат холодильної установки, що охолоджує льодяну воду.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- розробити математичну модель кристалізації льоду на вертикальній циліндричній поверхні з урахуванням особливостей теплообміну як з боку води, що кристалізується, так і з боку охолодного середовища (проміжного холодоносія або холодильного агенту, який випаровується), а також основних режимних та витратних параметрів процесу;
- провести експериментальні дослідження кристалізації льоду в умовах, характерних для роботи акумуляторів холоду;
- провести валідацію математичної моделі на основі експериментальних даних, наведених у літературі, а також власних експериментальних даних;
- отримати коригуючі співвідношення для розрахунку миттєвих значень товщини льоду у часі та визначення динаміки кристалізації льоду;
- визначити вплив режимних параметрів процесу наморозження на динаміку льодоутворення;
- розробити методику розрахунку миттєвої товщини наморозжуваного льоду на будь-який момент процесу льодоутворення та побудови кривої зміни товщини льоду в часі, дійсну у діапазоні режимних параметрів акумулятора холоду;
- запропонувати методики підбору акумуляторів теплової енергії періодичної дії з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні, які враховували б особливості роботи акумулятора, температурні параметри

роботи холодильної установки, швидкість накопичення льоду, оптимізацію електроспоживання.

Об'єктом дослідження є акумуляція теплової енергії в елементах акумуляторів холоду.

Предметом дослідження є динаміка кристалізації льоду на вертикальних охолоджуваних трубах в акумуляторах теплової енергії систем охолодження та кондиціювання повітря.

Методи досліджень. Математичне моделювання процесу льодоутворення на вертикальній циліндричній поверхні з врахуванням механізмів теплообміну з боку води, що кристалізується, та охолодного середовища (проміжного холодоносія або холодильного агента, який випаровується). Експериментальне дослідження за допомогою активного експерименту на оригінальній дослідній установці процесу льодоутворення. Обробка, аналіз та узагальнення дослідних даних та даних математичного моделювання за допомогою програм MS Excel та MathCad.

Наукова новизна одержаних результатів визначається тим, що вперше:

- розроблено математичну модель швидкості зростання товщини льоду на вертикальній циліндричній поверхні, яка враховує механізм теплообміну і може застосовуватись як для умов охолодження теплообмінної поверхні однофазним (проміжним) холодоносієм, так і холодильним агентом, який випаровується;
- отримано експериментальні дані зі зміни товщини льоду в часі на вертикальній трубі в залежності від температур кипіння холодильного агента та води, умов теплообміну (коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні та від води до міжфазної поверхні), швидкості води поблизу теплообмінної поверхні;
- підтверджено адекватність розробленої моделі кристалізації льоду для робочого діапазону льодоакумуляторів періодичної дії з охолодженням теплообмінної поверхні як проміжним теплоносієм, так і безпосередньо киплячим холодильним агентом за рухомої та нерухомої води у широкому діапазоні температур води та охолоджуючих речовин.

Набули подальшого розвитку:

- дослідження з вивчення швидкості льодоутворення в льодоакумуляторах періодичної дії за сталих температур охолодного середовища;
- оптичний метод вимірювання товщини льоду в часі. Спосіб було модифіковано одночасною відео- та фотозйомкою процесу кристалізації з їх синхронізацією лазерним маркером, що дозволило суттєво підвищити повторюваність і надійність отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів.

- Розроблено методику визначення миттєвої та максимальної товщини льоду за режимних параметрів процесу «зарядки» акумулятора холоду.
- Отримано коригуючі співвідношення, які враховують зміну теплового потоку в процесі льодоутворення та уточнюють результати розрахунків за математичною моделлю.

- Розроблено методику підбору льодоаккумуляторів періодичної дії, яка враховує особливості добового циклу роботи підприємства, аккумулятора теплової енергії та динаміку льодутворення.

- Розроблено пакет програм для оперативного підбору аккумуляторів холоду та розрахунку основних енергетичних та економічних показників роботи холодильної установки з льодоаккумулятором. Пакет може бути використаний у проектних організаціях шляхом його адоптації до конкретних умов роботи обладнання.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні та доказі наукових положень дисертації, розробці математичної моделі намоороження льоду на циліндричній поверхні, розробці та монтажі дослідного стенду з вивчення динаміки кристалізації льоду, розробці методики проведення експерименту та проведенні досліджень, аналізі й узагальненні результатів натурних та математичних досліджень, отриманні коригуючих рівнянь та розробці методики підбору льодоаккумуляторів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на 73-й, 75-й ÷ 78-й наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, НУХТ, 2007, 2009 ÷ 2012 р.р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: Сьогодення та перспективи» (м. Київ, НУХТ, 2010 р.), на V-й та VI-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Удосконалення малої хладотеплотехніки – використання холоду в харчовій галузі» (м. Донецьк, ДонНУЕТ, 2010 ÷ 2012 р.р.), на VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Техника и технология пищевых производств» (м. Могильов, МГУП, 2011 р.), на Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (м. Одеса, ОДАХ, 2011 р.), на Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 90-річчю з дня народження проф. В.Ф. Чайковського «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (м. Одеса, ОНАХТ, 2011 р.), на The First North and East European Congress on Food «NEEFood - 2012» (м. Санкт-Петербург, СПбДТИ(ТУ), 2012 р.), на VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Устойчивое развитие и искусственный холод» (м. Одеса, ОДАХ, 2012 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, у тому числі: 4 статі у фахових виданнях, 9 – в тезах та матеріалах наукових конференцій.

Структура дисертації. Робота складається з вступу, 8 розділів, висновків, 5 додатків. Основні матеріали викладені на 170 сторінках друкованого тексту, які містять 87 рисунків і 7 таблиць. Перелік літератури включає 230 джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи. Сформульовано мету та задачі дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Перераховано публікації з теми дисертації та перелічено конференції та семінари, на яких відбулася апробація результатів роботи.

Аналітичний огляд літератури.

Розглянуто класифікацію та конструктивні особливості сучасних акумуляторів теплової енергії. Визначено, що найбільш перспективним типом акумуляторів холоду є акумулятори теплової енергії періодичної дії з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні.

З аналізу наявних в літературі рівнянь з визначення часу наморозування льоду, встановлено, що всі співвідношення визначають час кристалізації попередньо заданої товщини льоду, яка приймається довільно.

Представлені основні теоретичні відомості з механізму кристалізації та теплофізичні властивості води та льоду.

Обґрунтовано необхідність розробки математичної моделі наморозування льоду на циліндричній теплообмінній поверхні, за допомогою якої можна визначити як максимально можливу товщини льоду, за заданих температурних режимів, так і розрахувати швидкість кристалізації льоду у будь-який момент періоду генерації льоду.

На основі критичного аналізу наявних у літературі моделей наморозування сформульовано основні принципи валідації математичної моделі, як на основі існуючих дослідних даних, так і на основі власних дослідів.

Варіанти оптимізації графіків енергоспоживання підприємств.

Наведено добові графіки холодо- та електроспоживання офісно-розважальними центрами та молокопереробними підприємствами різної продуктивності, отримані автором на основі реального моніторингу, а також на основі теоретичних розрахунків.

На прикладі ВАТ "Шосткинський міськмолкомбінат" розглянуто низку варіантів оптимізації графіків енергоспоживання. Шість варіантів передбачають пряме використання накопиченого холоду на потреби виробництва, які використовують теплоту плавлення для охолодження льодяної води, а один – зниження температури конденсації охолодженням води, що поступає на конденсатори.

Виявлено, що найбільш ефективним з варіантів прямого використання льоду є варіант, в якому накопичений холод максимально використовується у період ранкового піку. За цим варіантом оптимізації, при три ступеневій системі тарифів, можливо заощадити до 0,34 грн. на одній кВт·год при піковому тарифі 0,577 грн. / (кВт·год).

Варіант оптимізації з додатковим охолодженням води перед конденсатором є ефективним за умови використання в холодильній системі кожухотрубних або пластинчатих конденсаторів з водяним охолодженням.

На основі оптимізації графіків визначаються максимально допустимі часові інтервали періодів «зарядки» та «розрядки» акумулятора холоду, а також

холодильне навантаження, яке необхідно компенсувати. В усіх варіантах оптимізації період накопичення льоду припадає на нічний «провал» енергоспоживання. У цей час навантаження на холодильну установку мінімальне, що визначає значний резерв холодильної потужності для заморожування.

Диференціальне рівняння швидкості заморожування льоду на вертикальній циліндричній поверхні.

Розглядається багатошарова циліндрична поверхня теплообміну, яка зовні – поздовжньо омивається водою, а з середини – охолоджується холодильним агентом (рис. 1). Льодоутворення розглядається у радіальному напрямку, а задача загалом – у одновимірній постановці.

Вважаємо, що в кожен момент часу існує квазістаціонарний режим.

При складанні теплового балансу розглядаються граничні умови третього роду.

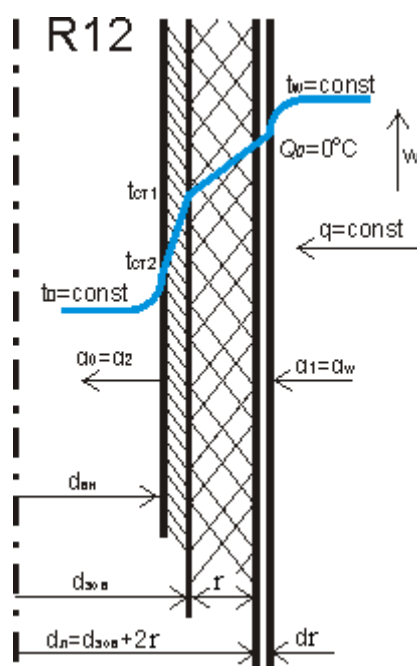


Рис. 1. Заморожування льоду біля циліндричної стінки

З теплового балансу після ряду перетворень одержуємо диференціальне рівняння з визначення швидкості заморожування льоду (1):

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{\left\{ \frac{\theta - t_0}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d_{306} + 2 \cdot r}{d_{306}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d_{306}}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_0 \cdot d_{вн}}} - \alpha_w \cdot (d_{306} + 2 \cdot r) \cdot \left[(t_w - \theta) + \frac{\omega^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{Pr^w} \right)}{3 \cdot C_p^w} \right] \right\}}{\rho \cdot (d_{306} + 2 \cdot r)} \quad (1)$$

Проведено варіативні розрахунки для аналізу впливу компонентів рівняння (1), які визначають температурні та витратні параметри процесу. Кожен розрахунок проводився зі зміною лише одного компоненту. Числові значення всіх інших параметрів приймалися відповідно до програми їх варіації в межах,

характерних для роботи реальних акумуляторів. Результати чисельних розрахунків, проведених у програмі MathCad, наведено на рис. 2 ÷ 5.

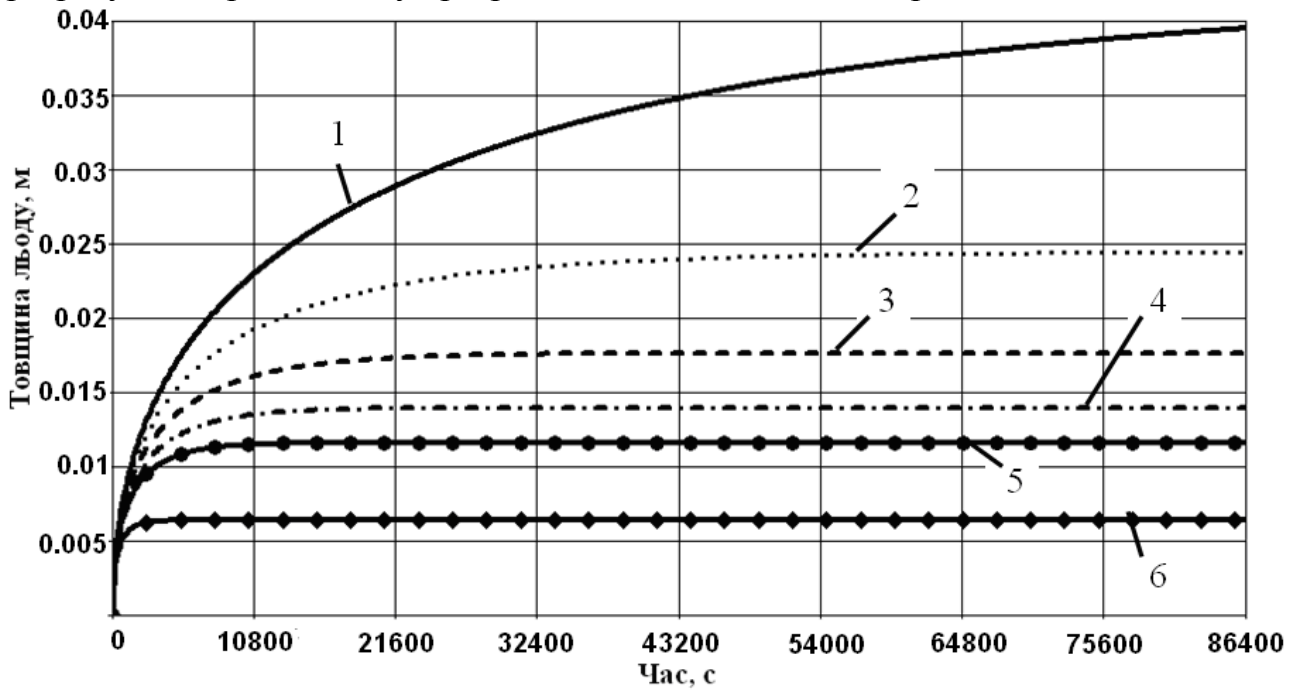


Рис. 2. Зміна товщини льоду в залежності від t_w :

1 – $t_w = 1\text{ °C}$, 2 – $t_w = 2\text{ °C}$, 3 – $t_w = 3\text{ °C}$, 4 – $t_w = 4\text{ °C}$, 5 – $t_w = 5\text{ °C}$, 6 – $t_w = 10\text{ °C}$.

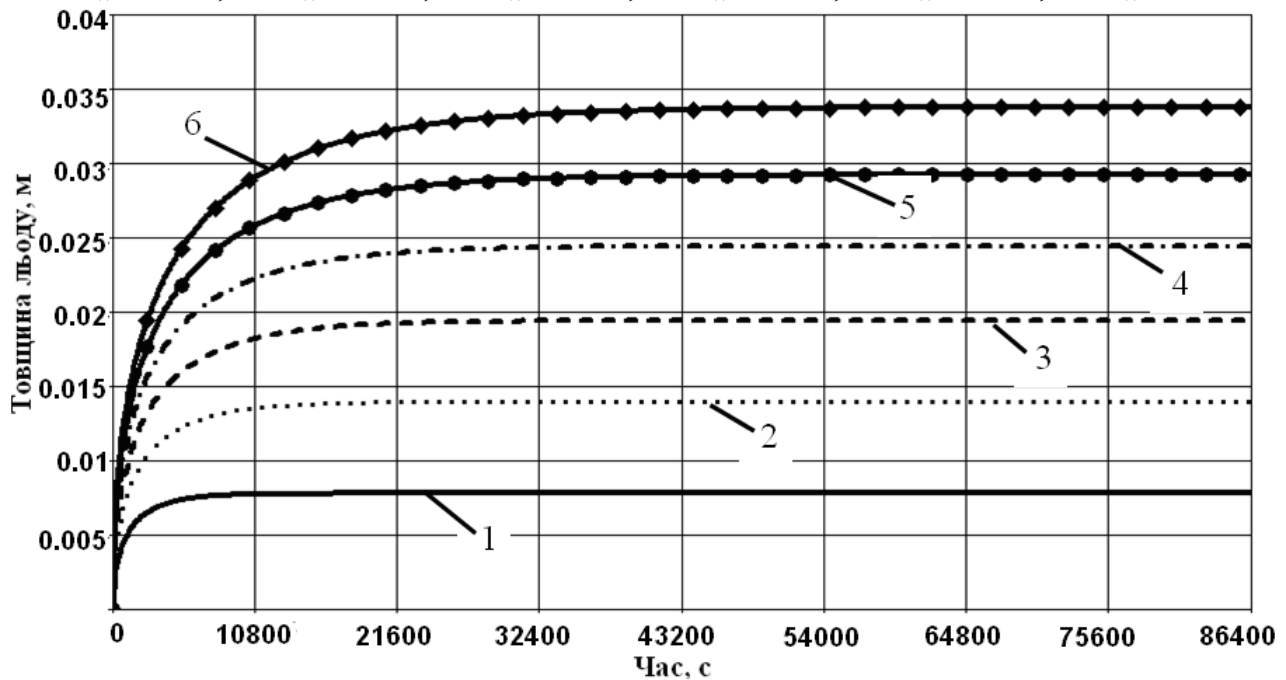


Рис. 3. Зміна товщини льоду в залежності від t_0 :

1 – $t_0 = -5\text{ °C}$, 2 – $t_0 = -10\text{ °C}$, 3 – $t_0 = -15\text{ °C}$, 4 – $t_0 = -20\text{ °C}$, 5 – $t_0 = -25\text{ °C}$,
6 – $t_0 = -30\text{ °C}$.

З рис. 2 та рис. 3 видно, що при зменшенні температур води та кипіння холодильного агенту максимально досяжна товщина льоду збільшується, а також зростає час виходу на асимптотичне значення товщини льоду.

Максимальна товщина льоду збільшується при зменшенні теплонадходжень від охолоджуваної води (рис. 4).

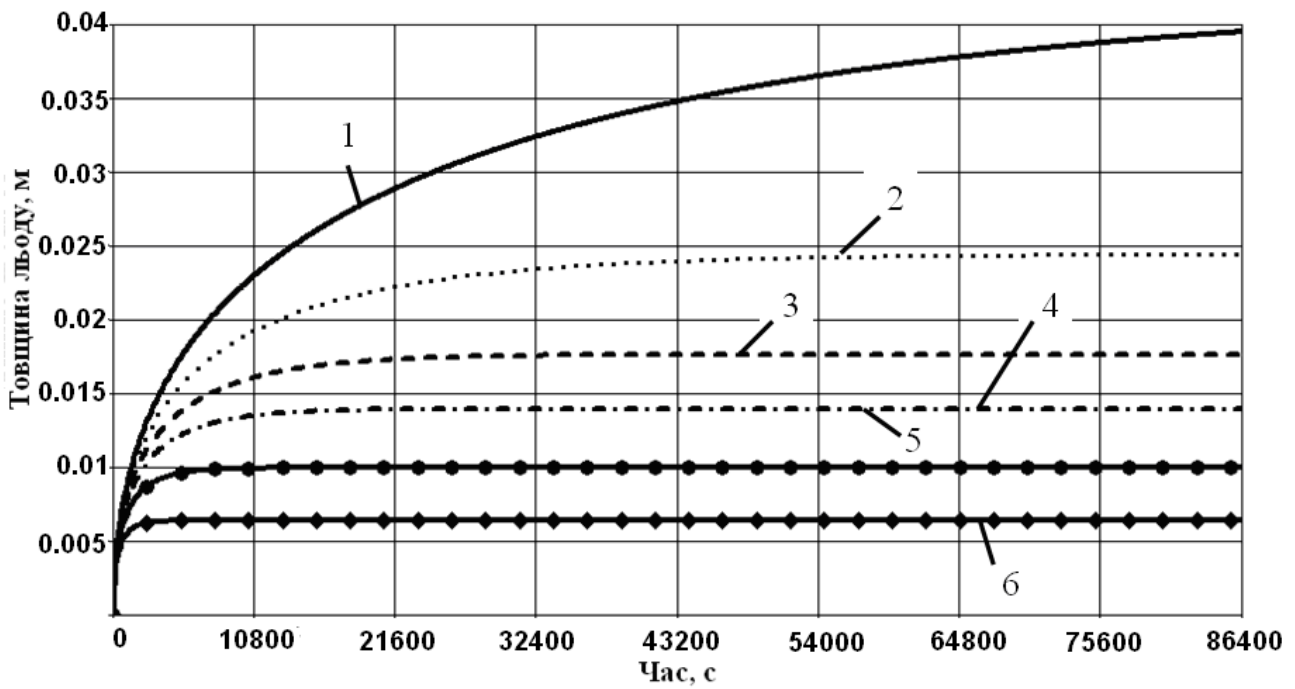


Рис. 4. Зміна товщини льоду в залежності від α_w :

1 – $\alpha_w = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 2 – $\alpha_w = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 3 – $\alpha_w = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,
4 – $\alpha_w = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 5 – $\alpha_w = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 6 – $\alpha_w = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

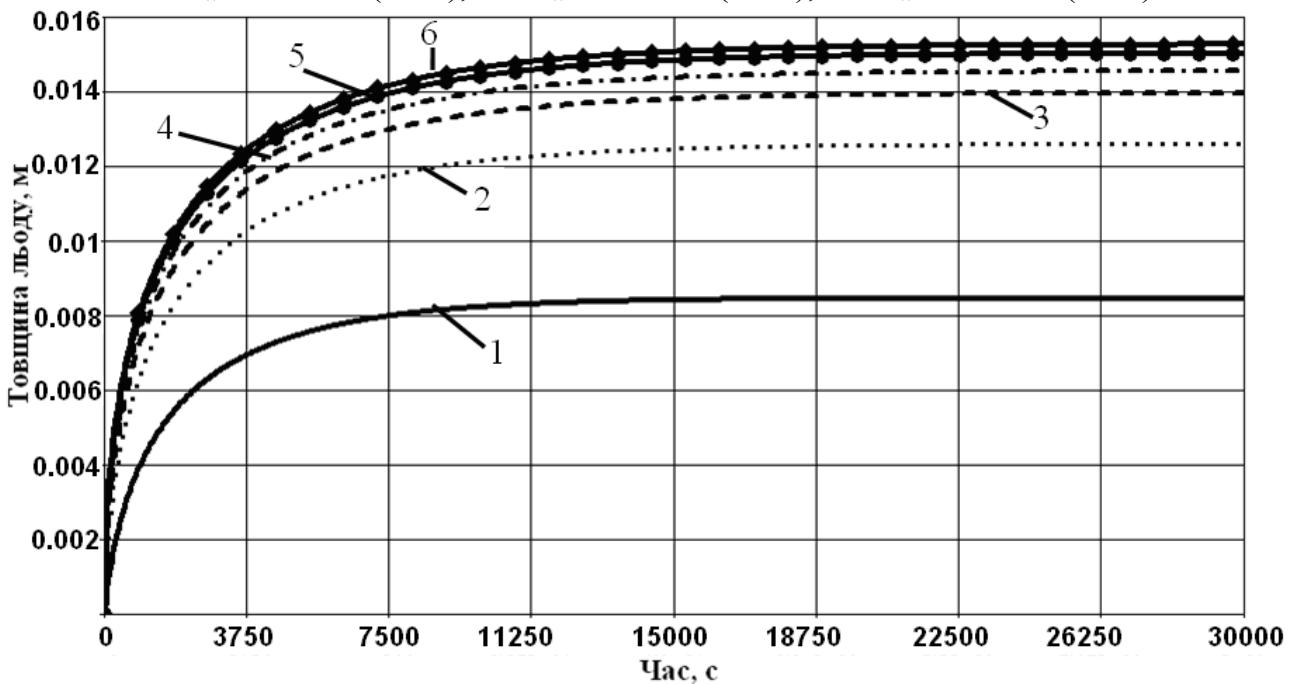


Рис. 5. Зміна товщини льоду в залежності від α_0 :

1 – $\alpha_0 = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 2 – $\alpha_0 = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 3 – $\alpha_0 = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,
4 – $\alpha_0 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 5 – $\alpha_0 = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 6 – $\alpha_0 = 20000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Температури води t_w та кипіння холодильного агенту t_0 є визначними умовами процесу. Дані, представлені на рис. 2 та рис. 3, можна рекомендувати для оцінки оптимальних температур робочих речовин льодоаккумуляторів з подальшим урахуванням особливостей конструкцій холодильних установок.

Оскільки розроблена модель має універсальний характер і може застосовуватись як для умов охолодження льодогенеруючої поверхні однофазним холодоносієм, так і для умов охолодження безпосередньо

киплячим холодильним агентом, особливу увагу приділено визначенню впливу коефіцієнту тепловіддачі при кипінні α_0 на швидкість кристалізації льоду. У рамках прийнятої моделі домінантного впливу механізму теплоперенесення при бульбашковому кипінні величина α_0 інтенсивно падає із зниженням теплового потоку. За умови накопичення льоду на теплообмінній поверхні слід очікувати як зниження теплового потоку, так і, відповідно, падіння коефіцієнту тепловіддачі при кипінні.

Як видно з рис. 5, при зниженні коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нижче $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, має місце різке зменшення максимально досяжної товщини льоду, більше ніж у двічі. Дані на рис. 5 отримано в рамках припущення про постійність коефіцієнту тепловіддачі при кипінні α_0 протягом всього періоду замороження. В реальних умовах слід очікувати значної зміни значень α_0 від таких, характерних для чистої поверхні (порядка $5500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), до значень на порядок менших при значних товщинах льоду.

Вплив змінного характеру теплового потоку і коефіцієнту тепловіддачі при кипінні протягом всього періоду замороження проілюстровано графіками на рис. 6 та рис. 7.

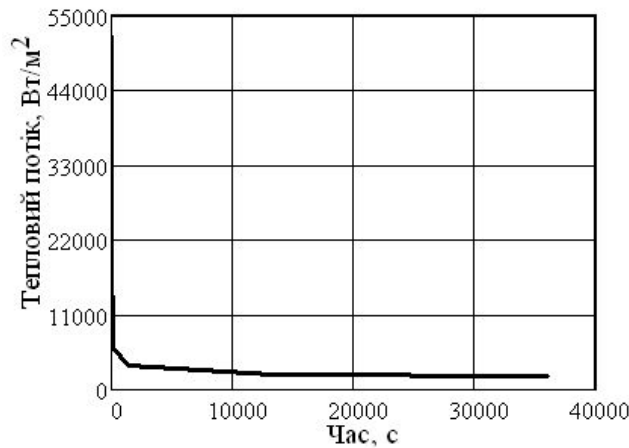


Рис. 6. Зміна теплового потоку в часі

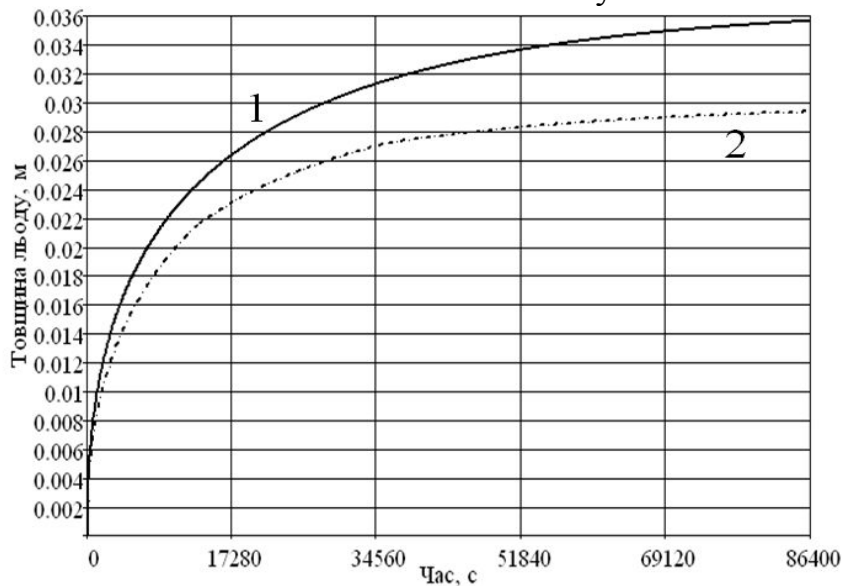


Рис. 7. Зміна товщини льоду в часі при $t_w = 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_0 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$:
1 – $\alpha_0 = 5250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – const; 2 – $\alpha_0 = f(q)$.

Криву 2 на рис. 7 отримано в результаті покрокового розрахунку у межах попередньорозбитих часових інтервалів. На основі визначення досягнутої товщини льоду на попередньому інтервалі, розраховувалися тепловий потік та коефіцієнт тепловіддачі при кипінні α_0 , які приймалися як режимні параметри та граничні умови для наступного інтервалу.

Закономірності тепловіддачі до киплячого холодильного агенту за режимних параметрів характерних для роботи акумуляторів холоду детально не досліджені. На сьогоднішній день в літературі відсутні дані, які дозволяють визначити домінантний механізм кипіння, а розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні α_0 відсутні. В цих умовах видається обґрунтованим застосувати напівемпіричний підхід для розробки співвідношень, при цьому для теоретичної моделі нами використано рівняння визначення коефіцієнту тепловіддачі для домінантного бульбашкового кипіння. Актуальність розробки таких співвідношень визначається тим що, акумулятори холоду з киплячим холодильним агентом є суттєво більш ефективними порівняно з акумуляторами з проміжним теплоносієм, оскільки перші використовують повний температурний напір холодильного циклу.

Експериментальна установка та проведення досліду.

Для забезпечення можливості вимірювання товщини льоду оптичними методами, експериментальна секція (рис. 8) виготовлена з органічного скла у формі труби, внутрішнім діаметром 174 мм. По осі апарату встановлено мідну трубу діаметром 10 мм. Висота дослідної ділянки 300 мм. Для забезпечення повторюваності дослідів одночасно проводилися досліди на трьох однакових секціях.

Експериментальна установка (рис. 9) одночасно забезпечує охолодження дослідних секцій та підтримання заданої температури оборотної води.

Установка та дослідні секції оснащено: термopарами, манометрами, вимірювальними лінійками, витратоміром, амперметрами, мірними стаканами, системою оптичного вимірювання товщини льоду.

Оптичне вимірювання товщини у процесі льодоутворення проводилося за допомогою веб-камер HP HD4110 та цифрового фотоапарату Canon EOS 350D DIGITAL, які керувалися з ПК.

Первинна обробка відео полягає у визначенні абсолютного часу появи льоду на теплообмінній поверхні.

З метою зменшення похибки вимірювання визначення розмірів накопиченого льоду проводилося за допомогою програм PixelRuler 2 та AutoCad 2008 (рис. 10). Максимальне відхилення показів вимірювання складає 0,1 мм.

Калібрування оптичного методу вимірювання проведено за допомогою скляних трубок.

Розроблений план досліду наведено у табл. 1.

Описано послідовність проведення дослідів на тиски більше і менше 1 бар.

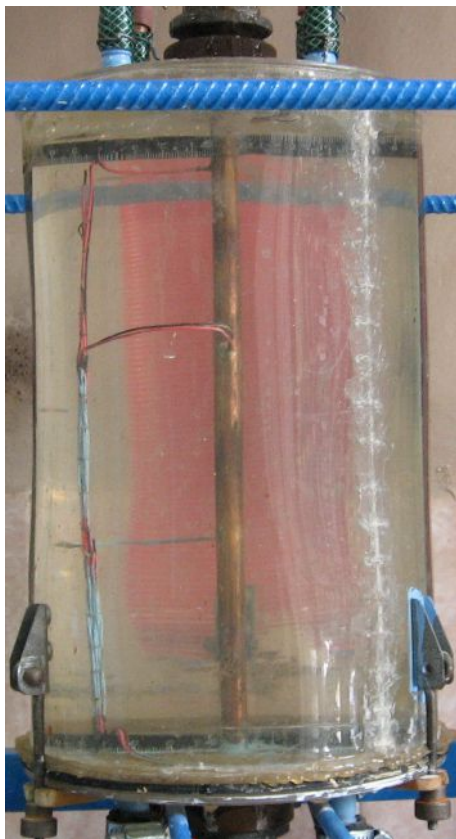


Рис. 8. Дослідна секція

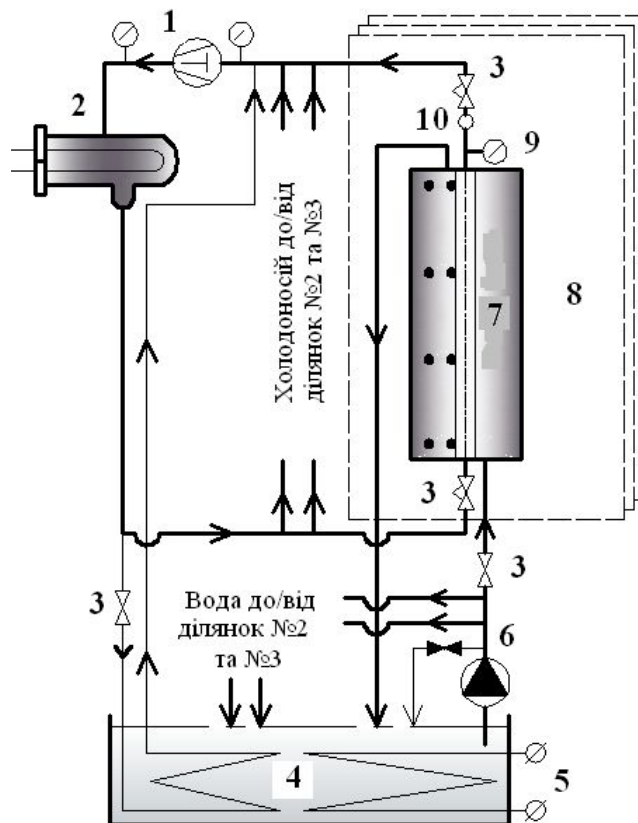


Рис. 9. Принципова схема дослідної установки:

- 1 – компресор, 2 – кожухотрубний конденсатор, 3 – регулюючий вентиль, 4 – ємність з водою, 5 – ТЕН, 6 – насос, 7 – дослідна труба, 8 – дослідна секція, 9 – манометр, 10 – оглядове віконце.

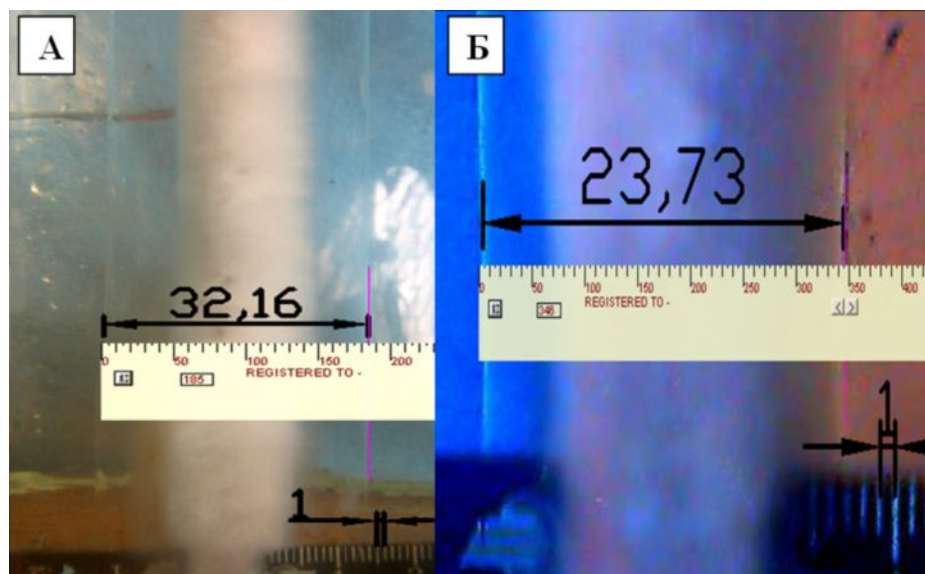


Рис. 10 Визначення діаметру льоду за фотографіями
 А – фотографія з фотоапарату, Б – фотографія з відео файлу веб-камери

План дослідів

$t_w, ^\circ\text{C}$	Межі коливання $t_w, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{оманом}}, \text{бар}$	Межі коливання $p_{\text{оманом}}, \text{бар}$	Серія дослідів
+1,5	+1,0 ÷ +2,0	-5	1,6	1,5 ÷ 1,7	№ 1
		-10	1,2	1,1 ÷ 1,3	
		-15	0,8	0,7 ÷ 0,9	
		-20	0,5	0,4 ÷ 0,6	
+4,5	+4,0 ÷ +5,0	-5	1,6	1,5 ÷ 1,7	№ 2
		-10	1,2	1,1 ÷ 1,3	
		-15	0,8	0,7 ÷ 0,9	
		-20	0,5	0,4 ÷ 0,6	
+7,5	+7,0 ÷ +8,0	-5	1,6	1,5 ÷ 1,7	№ 3
		-10	1,2	1,1 ÷ 1,3	
		-15	0,8	0,7 ÷ 0,9	
		-20	0,5	0,4 ÷ 0,6	
+10	+9,5 ÷ +10,5	-5	1,6	1,5 ÷ 1,7	№ 4
		-10	1,2	1,1 ÷ 1,3	
		-15	0,8	0,7 ÷ 0,9	
		-20	0,5	0,4 ÷ 0,6	

Обробка первинних даних.

Характер зміни температур у дослідних секціях та вузлових точках установки підтверджує, що в процесі проведення досліджень холодильна установка працювала в стаціонарному режимі як по контуру води, так і холодильного агенту.

На основі опрацювання відео файлів за вказаною методикою, отримано дослідні дані зміни товщини льоду в часі (рис. 11 ÷ 14).

Результати кожного режиму досліджень є збіжними і добре усереднюються, а також відзначаються повторюваністю.

Дослідні дані наведено за серіями №1 ÷ №4, які згруповано за температурою охолоджуваної води, що подається до дослідних секцій. Для кожної з серій №1 ÷ №4 при постійній температурі охолоджуваної води змінювали температуру кипіння в межах -5 ÷ -20 °C. Як видно з даних наведених на рис. 11 ÷ 14 практично всі криві мають асимптотичний характер, тобто в процесі льодогенерації досягається максимальна товщина льоду, причому при найменших температурах кипіння асимптотична товщина льоду перевищує аналогічний показник для вищих температур кипіння більше ніж

втричі. Збільшення температури охолоджуваної води призводить до суттєвого зменшення асимптотичної товщини льоду. Так, при температурі кипіння $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і при подачі води з температурою $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ асимптотична товщина льоду складає 4 мм, натомість при температурі води $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та температурі кипіння $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 18,25 мм.

Співставлення результатів експериментів та математичного моделювання.

В результаті аналізу рівнянь з визначення конвективного коефіцієнту тепловіддачі від води до теплообмінної поверхні для ламінарного режиму руху рідини в кільцевому каналі обрано співвідношення (2).

$$Nu = 3.66 + 1.2 \cdot \left(\frac{D_{\text{ен}}}{d_{3OB}} \right)^{-0.8} + \left[1 + 0.14 \cdot \left(\frac{D_{\text{ен}}}{d_{3OB}} \right)^{0.5} \right] \cdot \frac{0.19 \cdot \left(Pe \frac{d_z}{L} \right)^{0.8}}{1 + 0.117 \cdot \left(Pe \frac{d_z}{L} \right)^{0.467}} \quad (2)$$

Для інших режимів руху рідини (перехідний, турбулентний) є можливим використання будь-яких наявних у літературі рівнянь.

Для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при кипінні використано рівняння Данілової Г. Н. (3) або його модифікацію (4).

$$\alpha_0 = 550 \cdot \frac{P_{kp}^{1/4}}{T_{kp}^{7/8} \cdot M^{1/8}} \cdot q^{0.75} \cdot \left(0.14 + \left(1.6 + \frac{0.4}{1 - p_r} \right) p_r \right) \cdot \left(\frac{R_z}{R_{em}} \right)^{0.2}, \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \left[550 \frac{P_{kp}^{1/4}}{T_{kp}^{7/8} \cdot M^{1/8}} \cdot \left(0.14 + \left(1.6 + \frac{0.4}{1 - p_r} \right) p_r \right) \cdot \left(\frac{R_z}{R_{em}} \right)^{0.2} \right]^4 \cdot \Delta \hat{P} \quad (4)$$

Зазначено, що співвідношень для розрахунку тепловіддачі при кипінні за малих масових та теплових потоків у літературі не представлено.

Співставлення дослідних та розрахункових даних, одержаних за рівнянням (1), наведено на рис. 11 ÷ 14.

Рис. 11 ÷ 14 свідчать, що використання в рівнянні (1) сталого коефіцієнта тепловіддачі при кипінні α_0 призводить до отримання відмінних від дослідних даних результатів розрахунку. Однак, якісний характер зміни кривої льодоутворення повністю відповідає дослідним даним.

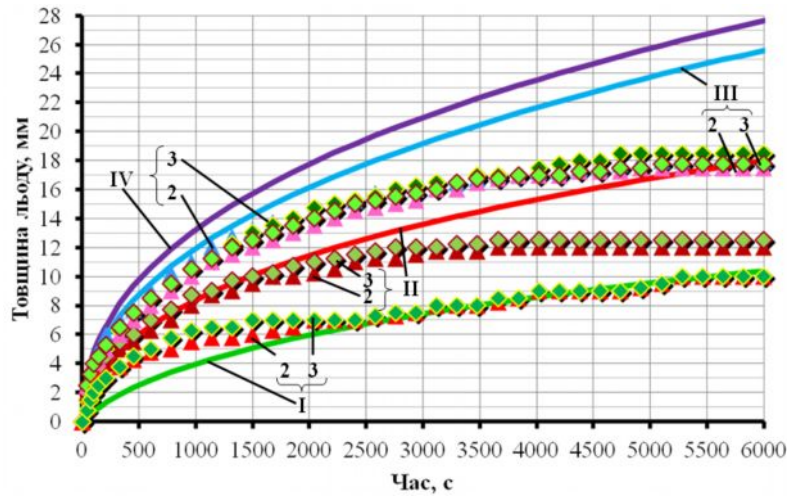


Рис. 11. Зміна товщини льоду в серії дослідів №1:

2, 3 – номери дослідних ділянок, I ÷ IV – криві розрахункового рішення;
 I – $t_0 = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; II – $t_0 = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; III – $t_0 = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 IV – $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

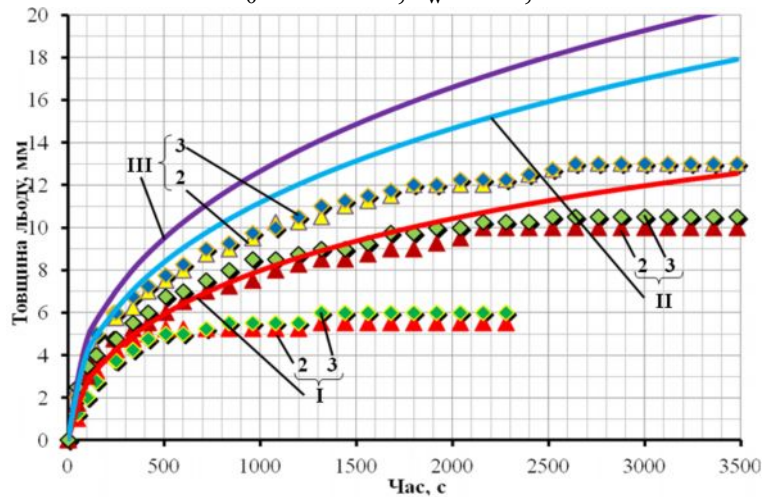


Рис. 12. Зміна товщини льоду в серії дослідів №2:

2, 3 – номери дослідних ділянок, I ÷ IV – криві розрахункового рішення;
 I – $t_0 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; II – $t_0 = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +4\text{ }^{\circ}\text{C}$; III – $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

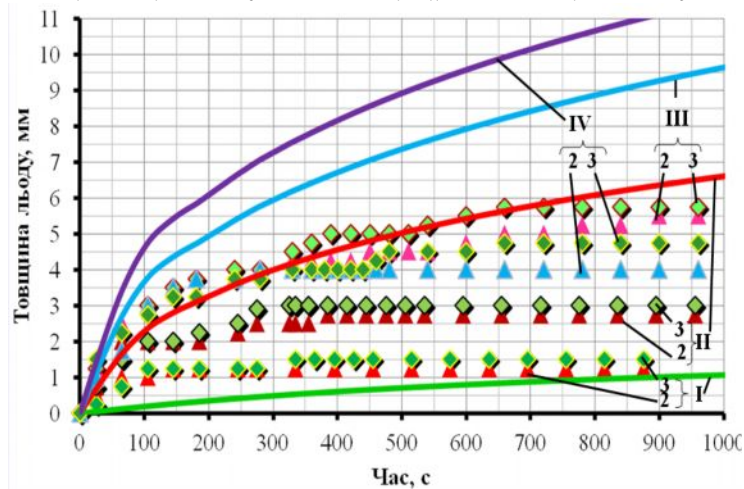


Рис. 13. Зміна товщини льоду в серії дослідів №3:

2, 3 – номери дослідних ділянок, I ÷ IV – криві розрахункового рішення;
 I – $t_0 = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +8\text{ }^{\circ}\text{C}$; II – $t_0 = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; III – $t_0 = -14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +7\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 IV – $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

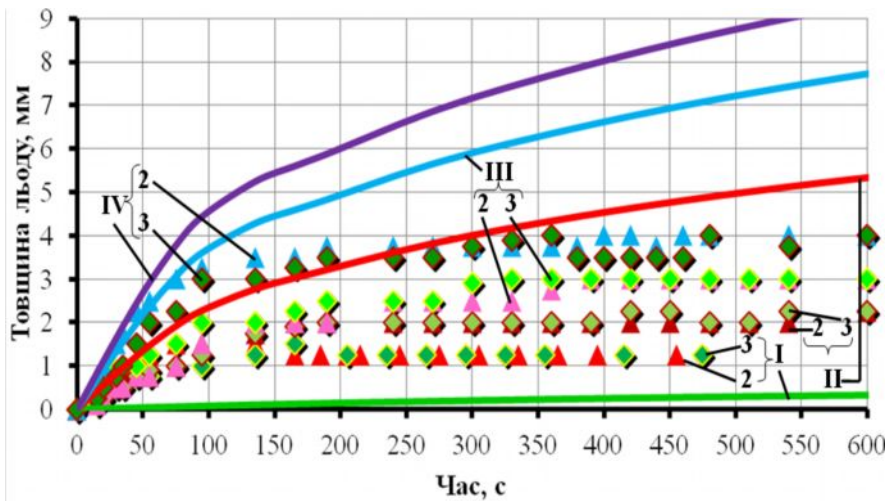


Рис. 14. Зміна товщини льоду в серії дослідів №4:

2, 3 – номери дослідних ділянок, I ÷ IV – криві розрахункового рішення;
 I – $t_0 = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$; II – $t_0 = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$; III – $t_0 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 IV – $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За дослідними даними проведено визначення теплових потоків від води за конвективного охолодження та від льоду. Одержаний графік зміни теплових потоків (рис. 15) обґрунтовує природу зменшення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні.

Зниження коефіцієнту тепловіддачі при кипінні, як результат збільшення товщини льоду, враховано покроковим розрахунком, за методикою описаною вище.

Для всіх серій дослідів результати покрокового розрахунку суттєво ближче до експериментальних даних. Приклад співставлення дослідних даних з результатами покрокового розрахунку наведено на рис. 16.

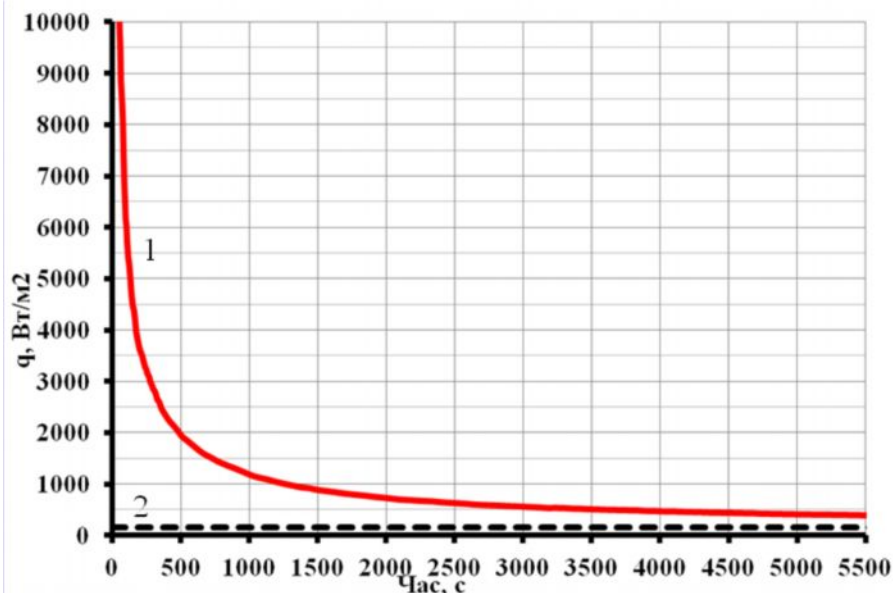


Рис. 15. Зміна теплового потоку в часі у при $t_0 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:
 1 – тепловиділення льоду, 2 – тепловиділення від охолодження води.

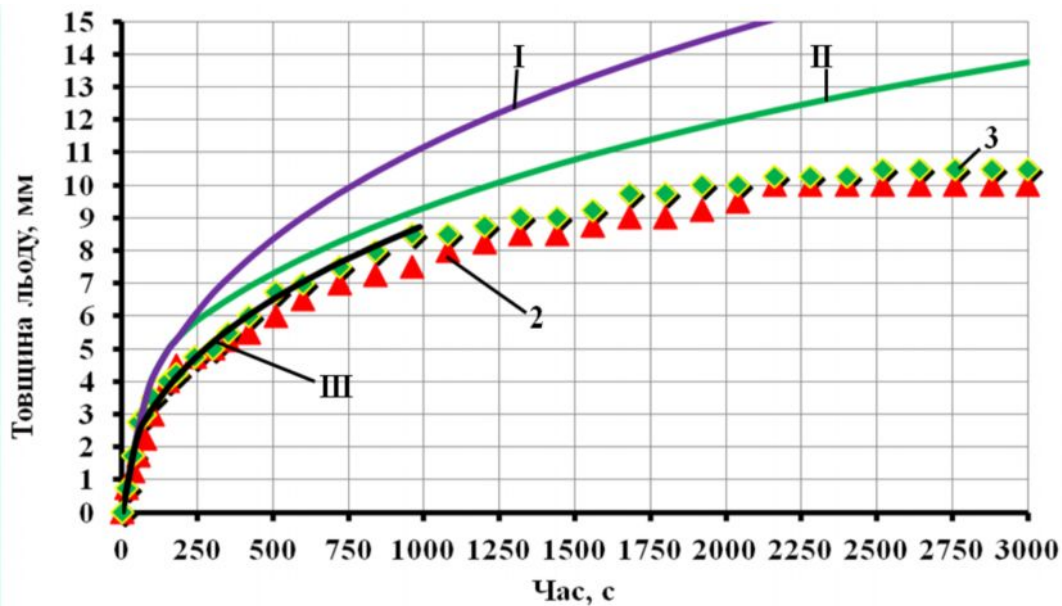


Рис. 16. Співставлення результатів розв'язання рівняння (1) з експериментальними даними при $t_0 = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_w = +4\text{ }^{\circ}\text{C}$:

2, 3 – номери дослідних ділянок, I – чисте рішення, II – початкова точка $\tau = 200\text{ с}$, крок $200 \rightarrow 500\text{ с}$, III – початкова точка $\tau = 50\text{ с}$, крок $50 \rightarrow 100 \rightarrow 200\text{ с}$.

Зменшення розрахункового кроку та наближення початкової точки до 0 дозволяють, для окремих дослідів, суттєво наблизити розрахункові дані до експериментальних. Але такий підхід вимагає надзвичайно трудомістких розрахунків.

Валідація моделі експериментальними даними отриманими за умов однофазного охолодження.

У сучасній літературі наявні первинні дослідні дані з наморозування, одержані на експериментальних установках, в яких охолодження дослідної труби відбувалося проміжним теплоносієм. Використання проміжного теплоносія забезпечило авторам постійний тепловий потік до охолоджуючої речовини.

А. Фертеллі наморозував лід на горизонтальній поліетиленовій трубі значної довжини. Вода була нерухомою та попередньо охолодженою до температури, близької до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, що давало можливість знехтувати теплонадходженнями від тертя та конвективного охолодження води.

Проведено розрахунки за рівнянням (1) у спрощеній формі на вихідні дані дослідів А. Фертеллі. Незважаючи на відсутність у роботі автора деяких вихідних даних, результати розрахунку добре узагальнюють дослідні дані та А. Фертеллі (рис. 17).

М. М. Мохамед наморозував лід на вертикальній мідній трубі. Вода - нерухома і мала початкову температуру близько $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відповідно, було знехтувано теплом від тертя, а конвективне охолодження води визначалося за відомими співвідношеннями вільної конвекції.

Оскільки температура води протягом дослідів падала, то розрахунки проведено для діапазону температур води в об'ємі від $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто після точки інверсії густини. До рівняння (1) підставлено середню температуру води

в об'ємі на вказаному інтервалі температур, яку визначено з дослідних даних автора.

З порівняння розрахункової кривої за пропонованою моделлю з дослідними даними М. М. Мохамеда (рис. 18), видно, що крива 2 описує дослідні дані з максимальною похибкою 6 %.

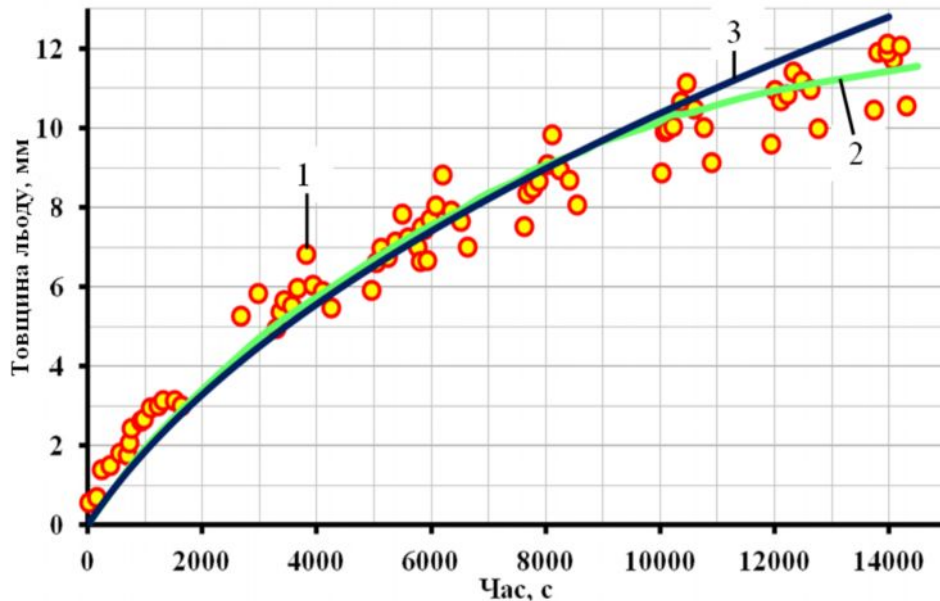


Рис. 17. Зміна товщини льоду в часі за $T_{в.вхід} = -5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$:

1 – дослідні дані А. Фертеллі, 2 – рішення за А. Фертеллі, 3 – рішення за спрощеним рівнянням (1).

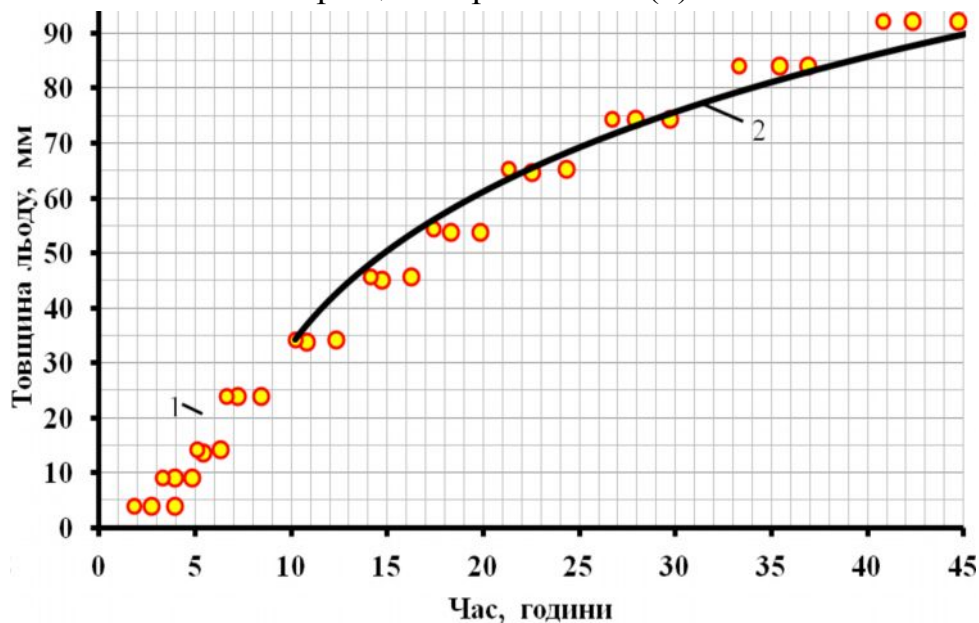


Рис. 18. Зміна товщини льоду в часі на вертикальній трубі:

1 – дослідні дані М. М. Мохамеда, 2 – розрахункова крива за $t_{w,ср} = 0,57\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати розрахунків за моделлю (1), наведені на рис. 17 та рис. 18, описують експериментальні дані з високою точністю. Таким чином, запропоновану модель можна рекомендувати для розрахунків акумуляторів холоду, основаних на однофазному охолодженні льодогенеруючої поверхні.

Коригування результатів розрахунків за рівнянням визначення товщини льоду.

Оскільки результати співставлення розрахунків за математичною моделлю (1) з експериментальними даними, отриманими за умови однофазного охолодження, свідчать про її адекватність та універсальність, видається можливим використати модель як основу для розробки напівемпіричних коригуючих співвідношень для визначення динаміки льодоутворення за умови охолодження льодогенеруючої поверхні киплячим холодоагентом.

Методика визначення коригуючих коефіцієнтів полягає у співставленні миттєвих значень товщини льоду, отриманих експериментально, з відповідними значеннями товщини розрахованими за рівнянням (1). При цьому значення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні визначалося за моделлю бульбашкового кипіння з тепловим потоком до «чистої» льодогенеруючої поверхні і режимних параметрів процесу рівних експериментальним.

Результати визначення миттєвих значень коригуючих коефіцієнтів наведено на рис. 19 ÷ 22.

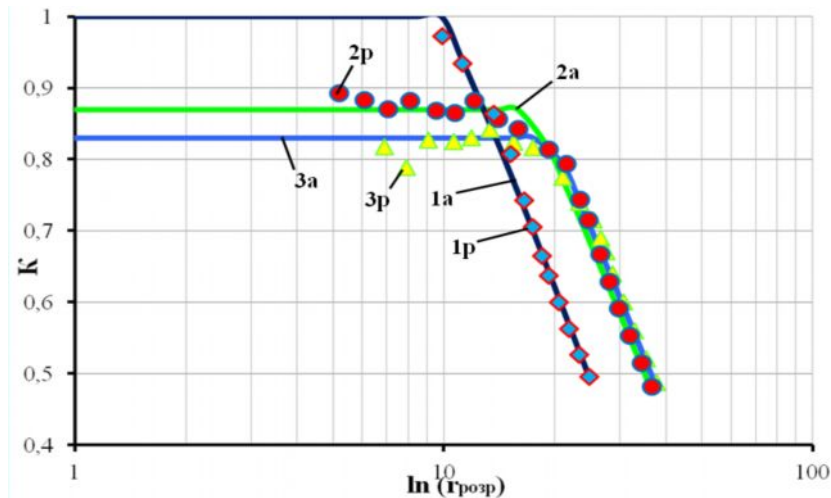


Рис. 19. Залежність коригуючого коефіцієнту від розрахункової товщини льоду за температури води $+1 \div +1,7$ °C:

р – миттєві значення коригуючого коефіцієнту, а – лінія тренда; 1 – $t_0 = -9$ °C, 2 – $t_0 = -16$ °C, 3 – $t_0 = -20$ °C.

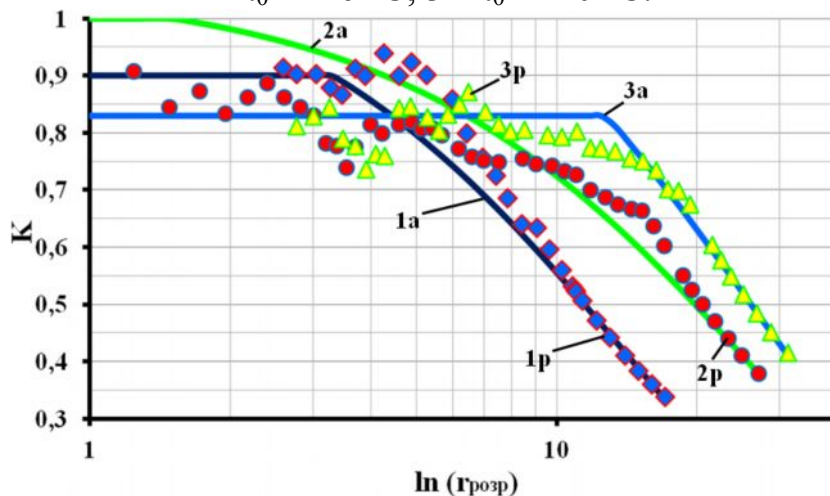


Рис. 20. Залежність коригуючого коефіцієнту від розрахункової товщини льоду за температури води $+4 \div +4,6$ °C:

р – миттєві значення коригуючого коефіцієнту, а – лінія тренда; 1 – $t_0 = -10$ °C, 2 – $t_0 = -16$ °C, 3 – $t_0 = -20$ °C.

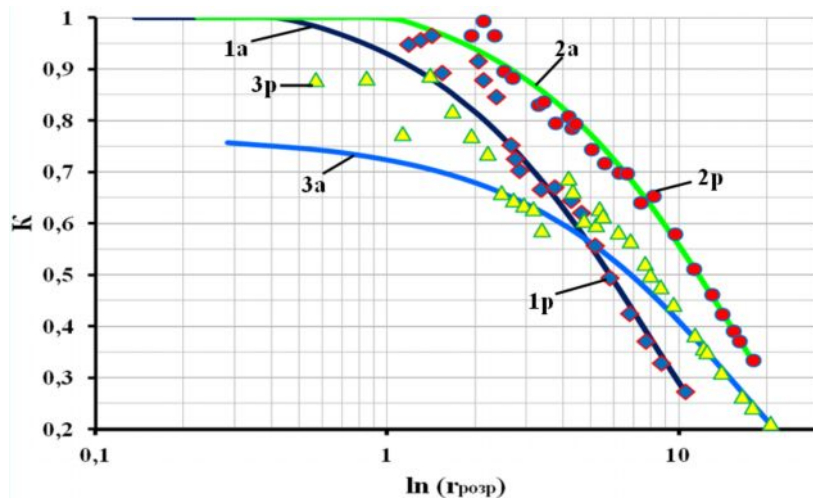


Рис. 21. Залежність коригуючого коефіцієнту від розрахункової товщини льоду за температури води $+7 \div +8$ °C:

p – миттєві значення коригуючого коефіцієнту, а – лінія тренда; 1 – $t_0 = -9$ °C, 2 – $t_0 = -14$ °C, 3 – $t_0 = -20$ °C.

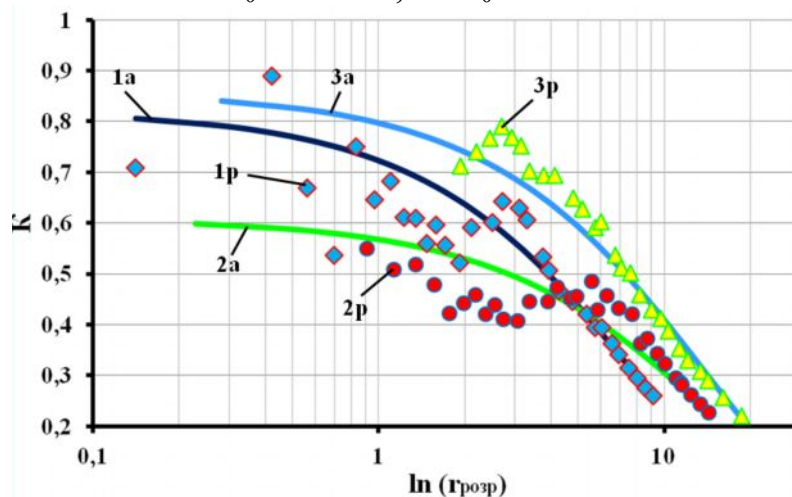


Рис. 22. Залежність коригуючого коефіцієнту від розрахункової товщини льоду за температури води $+10$ °C:

p – миттєві значення коригуючого коефіцієнту, а – лінія тренда; 1 – $t_0 = -9$ °C, 2 – $t_0 = -15$ °C, 3 – $t_0 = -20$ °C.

Апроксимацію миттєвих значень коригуючих коефіцієнтів на рис. 19 та рис. 20 проведено експоненціальною та лінійною лініями тренду, а на рис. 21 та рис. 22 – лише експоненціальною.

Отримано ряд напівемпіричних коригуючих співвідношень, представлених в табл. 2.

Розроблено послідовність визначення миттєвої товщини льоду в будь-який момент часу та побудови дійсного графіку зміни товщини льоду в часі.

На рис. 23 максимальне абсолютне відхилення розрахункової кривої 2, одержаної за використання двох коригуючих залежностей, від дослідних даних 1, складає 0,73 мм (4,84 %) у момент часу 2340 с. Відповідне відхилення кривої 3, одержаної з використанням лише експоненціальної коригуючої залежності, на той самий момент часу складає 0,29 мм (1,96 %). У момент часу 3600 с відхилення відповідно складають 0,05 мм (0,31 %) та 1,0 мм (5,9 %).

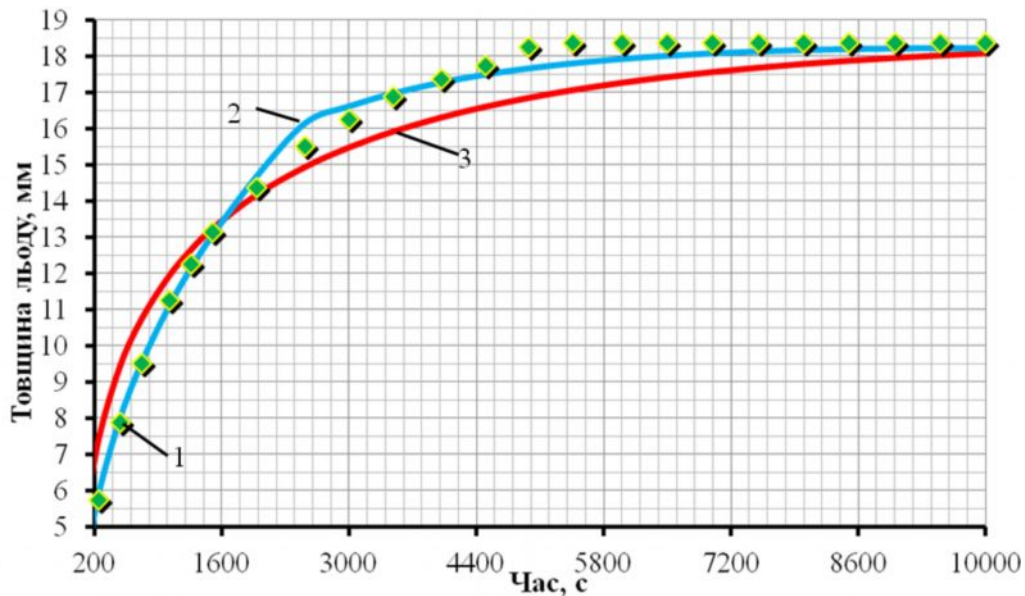


Рис. 23. Співставлення розрахункових та дослідних даних при $t_0 = -20\text{ °C}$, $t_w = +1,5\text{ °C}$:

1 – усереднені дослідні дані, 2 – крива, одержана з використанням двох коригуючих залежностей, 3 – крива, одержана з використанням однієї коригуючої залежності.

Таблиця 2

Коригуючі залежності

Температури кипіння та води	Сталий коригуючий коефіцієнт, K_{const}	Експоненціальна функція, K_f	Ступінь достовірності експоненціальної апроксимації, R^2
$t_0 = -9\text{ °C}$, $t_w = +1,5\text{ °C}$	$K = 1,00$	$K = 1,6088 \cdot e^{-0,048 \cdot r}$	0,9901
$t_0 = -16\text{ °C}$, $t_w = +1\text{ °C}$	$K = 0,87$	$K = 1,4786 \cdot e^{-0,031 \cdot r}$	0,9922
$t_0 = -20\text{ °C}$, $t_w = +1,5\text{ °C}$	$K = 0,83$	$K = 1,4868 \cdot e^{-0,03 \cdot r}$	0,9961
$t_0 = -10\text{ °C}$, $t_w = +4,6\text{ °C}$	$K = 0,90$	$K = 1,1418 \cdot e^{-0,072 \cdot r}$	0,9907
$t_0 = -16\text{ °C}$, $t_w = +4\text{ °C}$	$K = 1,00$	$K = 1,059 \cdot e^{-0,038 \cdot r}$	0,9747
$t_0 = -20\text{ °C}$, $t_w = +4\text{ °C}$	$K = 0,83$	$K = 1,3485 \cdot e^{-0,038 \cdot r}$	0,9967
$t_0 = -9\text{ °C}$, $t_w = +7,5\text{ °C}$	$K = 1,00$	$K = 1,057 \cdot e^{-0,129 \cdot r}$	0,9881
$t_0 = -14\text{ °C}$, $t_w = +7\text{ °C}$	$K = 1,00$	$K = 1,0697 \cdot e^{-0,065 \cdot r}$	0,9919
$t_0 = -20\text{ °C}$, $t_w = +8\text{ °C}$	---	$K = 0,77 \cdot e^{-0,063 \cdot r}$	0,9881
$t_0 = -9\text{ °C}$, $t_w = +10\text{ °C}$	---	$K = 0,8198 \cdot e^{-0,126 \cdot r}$	0,9694
$t_0 = -15\text{ °C}$, $t_w = +10\text{ °C}$	---	$K = 0,6074 \cdot e^{-0,069 \cdot r}$	0,9635
$t_0 = -20\text{ °C}$, $t_w = +10\text{ °C}$	---	$K = 0,8581 \cdot e^{-0,074 \cdot r}$	0,9919

Прикладні методики та програми для визначення товщини льоду.

Детально описано та представлено у вигляді структурної схеми послідовність підбору акумулятора теплоти з використанням добових графіків холодо- та електроспоживання підприємства та моделі наморозування льоду.

На базі розробленої методики підбору створено пакет прикладних програм у середовищі MathCad та Excel для автоматичного розрахунку: максимальної товщини льоду, яка може утворитися за прийнятих умов; часу наморозування максимальної (асимптотичної) товщини льоду; об'єму та маси льоду, накопиченого на вказаній теплообмінній ділянці; середньої швидкості накопичення льоду; середньої витрати холоду $Q_{0,i}$; необхідної номінальної потужності електродвигуна компресора W_i ; споживаної електричної енергії E_i та витрати коштів на оплату спожитої електричної енергії A_i . Окрім того, автоматично будується графік зміни товщини льоду в часі з нанесеними теоретичною та реальною кривими, графік зміни номінальної потужності електродвигуна та споживаної потужності в залежності від товщини льоду, вираженої у відсотках.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичну модель процесу утворення льоду на вертикальній циліндричній охолоджуваній поверхні. Модель має універсальний характер і може безпосередньо використовуватись для розрахунку динаміки накопичення льоду за умови охолодження льодогенеруючої поверхні однофазним холодоносієм. Вказана модель узагальнює дослідні дані, наявні у літературі з високою точністю.

2. На базі запропонованої моделі розроблено напівемпіричні коригуючі співвідношення, які дозволяють розрахувати динаміку накопичення льоду за умови безпосереднього охолодження киплячим холодильним агентом.

3. Розроблено модель динаміки льодоутворення на циліндричній поверхні, яка дозволяє визначати максимальну та поточну товщину льоду в часі.

4. Вдосконалено оптичний метод вимірювання товщини льоду шляхом одночасного запису відео- та фотофайлів, їхньої синхронізації за допомогою лазерного маркера та паралельного визначення розмірів програмами PixelRuler 2 та AutoCad 2008, що суттєво підвищило точність.

5. Розроблено методику підбору льодоаккумуляторів періодичної дії, що враховує динаміку кристалізації води на циліндричній теплообмінній поверхні, особливості циклу холодильної установки, конструктивні особливості акумуляторів теплової енергії та добові коливання споживання холоду та електроенергії. Методика дає змогу проектним організаціям підібрати акумулятори холоду з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні з врахуванням умов роботи апарату та добових графіків енергоспоживання підприємства, що знижує споживання електричної енергії холодильною установкою. Методика є завершеною і може бути передана до проектних організацій.

6. Розроблено пакет програм для підбору акумуляторів холоду та розрахунку основних енергетичних та економічних показників роботи холодильної установки з льодоакумулятором. Передбачено можливість адаптації пакету програм до конкретних умов роботи обладнання.

7. Розроблено дослідний стенд для вивчення динаміки кристалізації льоду на вертикальних охолоджуваних трубах за наступних умов: вода рухається вздовж теплообмінної поверхні зі сталою швидкістю, температури води на вході до дослідної секції та кипіння є сталими, безпосереднє охолодження киплячим холодоносієм. Дослідна установка може широко використовуватись як для подальших досліджень цього напрямку (збільшення діаметрів охолоджуваних труб, зміна швидкостей руху води та інше), так і для вивчення процесів кріоконцентрування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пилипенко О. Ю. Обґрунтування доцільності використання акумуляторів холоду з фазовим переходом / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 5 (115). – С. 11-15.

2. Пилипенко О. Ю. Варіанти оптимізації енергоспоживання на виробництво штучного холоду / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – 2010. – Вип. 24. – С. 54-62.

3. Пилипенко О. Ю. Аналіз впливу складових рівняння з визначення швидкості наморозження льоду на результат розрахунку / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Холодильна техніка і технологія. – 2012. – № 3 (137). – С. 24-28.

4. Пилипенко О. Ю. Диференціальне рівняння визначення швидкості наморозження льоду на вертикальній циліндричній поверхні / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 29. – С. 160-168.

5. Пилипенко О. Ю. Математична модель та алгоритм вивчення швидкості заморожування водного льоду / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 76-та наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 12-13 квітня 2010 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2010. – Ч. 3. – С. 58.

6. Пилипенко О. Ю. Експериментальна установка та аналітичне визначення швидкості наморозження води на вертикальній циліндричній поверхні / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології : Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, 18-19 квітня 2011 р. : зб. тез. доповідей – О. : ОДАХ, 2011. – С. 3-4.

7. Пилипенко А. Ю. Анализ суточных колебаний тепловой и электрической нагрузок молокоперерабатывающих предприятий и варианты их оптимизации / А. Ю. Пилипенко, Я. И. Засядько // Техника и технология пищевых производств : VIII Междунар. науч.-техн. конф., 27-28 апреля 2011 р. : тез. докладов – Могилев. : УО «МГУП», 2011. – Ч. 2. – С. 100-101.

8. Пилипенко А. Ю. Разработка математической модели и алгоритма ее корректирования по определению скорости намораживания воды на вертикальной цилиндрической поверхности / А. Ю. Пилипенко, Я. И. Засядько // Техника и технология пищевых производств : VIII Междунар. науч.-техн. конф., 27-28 апреля 2011 р. : тез. докладов – Могилев. : УО «МГУП», 2011. – Ч. 2. – С. 102-103.

9. Пилипенко О. Ю. Вибір розрахункової формули визначення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні холодоагенту R12 / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько, В. С. Глушков // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології : Міжнар. наук.-техн. конф., 17-20 травня 2011 р. : зб. тез. доповідей – О. : ОНАХТ, 2011. – С. 98-99.

10. Пилипенко О. Ю. Вибір розрахункової формули визначення коефіцієнта тепловіддачі за вимушеного руху теплоносія вздовж поверхні теплообміну у циліндричному кільцевому каналі / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько, Ю. О. Веремієнко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології : Міжнар. наук.-техн. конф., 17-20 травня 2011 р. : зб. тез. доповідей – О. : ОНАХТ, 2011. – С. 107-108.

11. Пилипенко О. Ю. Дослідна установка та послідовність проведення дослідів на замороження води та танення льоду на вертикальній трубі / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько, В. В. Поборезніченко // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 78-а Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 2-3 квітня 2012 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2012. – Ч. 2. – С. 192.

12. Pilipenko O. Experimental study of the ice build up rate on a vertical pipe / O. Pilipenko, Y. Zasydtko // The First North and East European Congress on Food «NEEFood-2012», 22-24 April 2012 : Book of abstract - St.Petersburg, 2012. – P. 42.

13. Pilipenko O. Refining a mathematical model of ice build up on a vertical pipe according to experimental data / O. Pilipenko, Y. Zasydtko // The First North and East European Congress on Food «NEEFood-2012», 22-24 April 2012 : Book of abstract - St.Petersburg, 2012. – P. 100-101.

АНОТАЦІЯ

Пилипенко О. Ю. Динаміка кристалізації льоду на вертикальних охолоджуваних трубах в елементах акумуляторів теплової енергії систем охолодження та кондиціонування повітря. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Національний університет харчових технологій, Київ, 2012.

Обґрунтовано можливість зменшення електроспоживання підприємствами молочної промисловості, а також офісно-розважальними центрами за рахунок суттєвого зниження споживання холоду в години пікового енергоспоживання шляхом акумуляції холоду в нічні години з подальшим його використанням в години максимального енергоспоживання.

Компенсація пікового холодоспоживання реалізовувалася безпосередньо використанням накопиченого холоду на зниження температури холодоносія або шляхом зниження температури конденсації в циклі холодильної установки.

Розроблено математичну модель наможення льоду на циліндричній теплообмінній поверхні, яка охолоджується безпосередньо киплячим холодильним агентом або однофазним теплоносієм.

Адекватність моделі підтверджено власними дослідними даними та даними, що містяться в літературі.

Показано, що за умови реалізації охолодження льодогенеруючої поверхні однофазним теплоносієм, тобто за умови сталого теплового потоку від охолоджуваної поверхні, модель узагальнює експериментальні дані з точністю $\pm 6\%$, і безпосередньо може використовуватись для розрахунку та проектування акумуляторів холоду такого типу. Для випадку охолодження льодогенеруючої поверхні киплячим холодильним агентом розроблено напівемпіричну методику узагальнення дослідних даних та отримано систему коригуючих співвідношень.

Розроблено методики розрахунку миттєвої товщини льоду на будь-який час циклу наможення у межах від 0 до 15000 с, а також побудови графіків зміни товщини льоду в часі.

Розроблено методики та програми розрахунку акумуляторів теплової енергії з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні з безпосереднім охолодженням льодогенеруючої поверхні.

Ключові слова: математична модель, кристалізація, лід, дослід, акумулятор теплової енергії, теплообмін, кореляція, валідація, льодоакумулятор.

АННОТАЦИЯ

Пилипенко А. Ю. Динамика кристаллизации льда на вертикальных охлаждаемых трубах в элементах аккумуляторов тепловой энергии систем охлаждения и кондиционирования воздуха. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2012.

Диссертация посвящена исследованию динамики льдообразования на вертикальных охлаждаемых поверхностях и разработке научнообоснованных методик расчета и подбора аккумуляторов тепловой энергии периодического действия с накоплением льда на теплообменной поверхности.

Разработаны варианты оптимизации реальных графиков электропотребления ООО «Шосткинский гормолкомбинат». Представлены варианты оптимизации с использованием накопленного холода на нужды технологического процесса и на снижение температуры конденсации.

Разработана математическая модель процесса льдообразования на вертикальной цилиндрической поверхности.

Уравнение скорости льдообразования решено численными методами при варьировании режимных параметров процесса, что позволило оценить степень влияния основных режимных параметров процесса на динамику кристаллизации льда.

Выполнена валидация предложенной математической модели путем сопоставления с имеющимися в литературе данными, полученными в условиях, отражающих частные случаи предложенной модели. Показано, что для условий охлаждения льдогенерирующей поверхности однофазным хладоносителем модель описывает имеющиеся в литературе данные с максимальной погрешностью 6 % и может быть непосредственно рекомендована к расчетам.

Разработана экспериментальная установка для изучения процесса намораживания льда на вертикальной трубе, охлаждаемой непосредственным кипением холодильного агента.

Для непрерывного измерения изменяющейся толщины льда во времени использовался оптический метод измерений. Проводилась одновременная фото- и видеосъемка с помощью цифровой техники, которая управлялась с помощью компьютера. Синхронизация осуществлялась путем подачи лазерного маркера, который фиксировался фото- и видеокамерой. Измерение толщины льда на фото- и видеографических файлах проводилось с помощью программ PixelRuler 2 и AutoCad 2008. По результатам калибровки точность измерения толщины льда составила 0,1 мм.

Результаты расчетов по предложенной математической модели сопоставлены с полученными таким образом экспериментальными данными. Величины коэффициентов теплоотдачи к кипящему внутри льдогенерирующей трубы холодильному агенту, которые использовались в математической модели, определялись в рамках допущения о преобладающем механизме пузырькового кипения. При этом снижение интенсивности теплоотдачи, как следствие падения теплового потока в результате роста толщины льда, учитывалось путем применения пошагового расчета. При таком подходе на выделенных участках временного интервала льдообразования определялись дискретнолокальные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от осредненной на i -том интервале толщины льда. Прирост толщины льда на каждом i -том интервале рассчитывался на основании допущения о постоянстве значения коэффициента теплоотдачи на текущем интервале. Достигнутая толщина льда на $i-1$ интервале принималась как граничные условия для i -го интервала. Результаты расчетов, выполненных таким образом, при надлежащем выборе интервалов существенно приблизились к экспериментальным данным.

На основе предложенной математической модели разработаны корреляционные соотношения, позволяющие определить мгновенную толщину льда при льдообразовании на непосредственно охлаждаемых льдогенерирующих поверхностях в широком диапазоне изменений температур воды, подводимой к теплообменной поверхности, и кипящего холодильного агента. Соотношения рекомендовано использовать при расчете и проектировании аккумуляторов тепловой энергии периодического действия с

накоплением льда на теплообменной поверхности при её непосредственном охлаждении кипящим холодильным агентом.

На основании предлагаемой модели и корреляционных соотношений разработана методика подбора аккумуляторов тепловой энергии периодического действия с накоплением льда на теплообменной поверхности с её охлаждением однофазным теплоносителем или кипящим холодильным агентом. Указанная методика позволяет определить максимально возможную толщину льда при конкретных условиях работы холодильной машины. Благодаря учету условий работы, определяется оптимальная толщина льда соответствующая конкретным условиям производства, что в свою очередь оптимизирует график холодопотребления.

Разработан пакет программ для оперативного подбора аккумуляторов холода и расчета основных энергетических и экономических показателей.

Ключевые слова: математическая модель, кристаллизация, лёд, эксперимент, аккумулятор тепловой энергии, теплообмен, корреляция, валидация, льдоаккумулятор.

SUMMARY

A.U. Pilipenko. Dynamics of ice crystallization on vertical cooled down pipes in elements of thermal energy accumulators within refrigeration and air-conditioning systems. - Manuscript.

Dissertation for the gaining of scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.14.06 – Technical thermo physic industrial heat-and-power engineering. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2012.

The possibility of the reduction of power consumption at dairy plans and business centers has been proven. This reduction can be achieved due to a significant decrease in cold consumption during the peak consumption periods by means of the cold accumulation at night time with its further realization during the periods of cold maximum consumption. Compensation in peak cold consumption may be realized by the use of cold previously accumulated directed towards the reduction of cooling agent's temperature or by means of the reduction of condensation temperature within the cycle of the refrigeration unit. A mathematical model has been developed which accounts for ice growth rate over the cylindrical heat transfer surface which is being directly cooled down by the evaporating refrigerants or by means of convective one phase cooling agent. The model has been validated by the experimental data obtained by the author as well as by the data available in literature. It has been shown that under the conditions of the ice generated surface cooling by one phase cooling agent i.e. under the condition of the constant heat flux from the cooling surface, the model generalizes experimental data with an accuracy $\pm 6\%$ and thus may be used directly for the design calculations of cold accumulators of the said type. Under the condition of the ice generating surface cooling directly by means of the evaporating refrigerant, a semi-empirical method of the experimental data correlation has been obtained. The developed method allows calculating the immediate ice thickness for any time within

a cycle of icing at a range of 0...15000s. It also allows drawing the graphs of ice thickness growth in time. The method and software program for the design calculations of thermal accumulations with ice generations on the heat transfer surface with a direct cooling have been presented.

Key words: mathematical model, crystallization, ice, experiment, thermal energy accumulator, hit-transfer, correlation, validation, ice generator.